

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 200324034

UDC_____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

微波陶瓷材料与陶瓷电容的测量理论及 方法研究

Research for Theory and Method of Measuring Microwave
Ceramic Material and Ceramic Capacitor

骆超艺

指导教师姓名: 肖 芬 副教授

专 业 名 称: 无 线 电 物 理

论文提交日期: 2006 年 6 月

论文答辩时间: 2006 年 6 月

学位授予日期: 2006 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密 (), 在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名:

日期: 年 月 日

导师签名:

日期: 年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

作者姓名：骆超艺

论文题目：微波陶瓷材料与陶瓷电容的测量理论及 方法研究

作者简介：骆超艺，男，1980年11月出生，2003年9月师从于厦门大学肖芬副教授，于2006年 月获硕士学位。

中 文 摘 要

微波介质陶瓷现已广泛应用于微波技术的许多领域，特别是移动通信系统中。对其介电性能的测定已引起人们越来越多的关注。在此基础上，使用陶瓷材料作为介质的多层陶瓷贴片电容也已大量地用于射频和微波电路中，因此对其电路参数的准确测量也显得日益重要。

本文根据 863 项目“新型微波介质陶瓷材料与元件的研制”的需要，围绕着陶瓷材料与陶瓷电容的测量理论和方法进行研究，所作的主要工作可概括如下

1. 提出一种新的求解任意谐振腔内被测介质复电磁参数的理论方法——本征值法。先把该方法应用于各种平行板内介质谐振器复介电常数的计算，利用数学软件 MATLAB 中的 PDE（偏微分方程）工具箱方便地解决这一类问题，避免了推导和求解超越方程的困难。再应用本征值法计算矩形谐振腔内大尺寸电介质和高介陶瓷样品的相对复介电常数，结果较准确，突破了经典微扰法的局限。
2. 从电磁场角度出发，更严谨地推导了微波测量和计算中常用的三个基本关系式，使测量理论更具可靠性。
3. 采用夹具去嵌入的方法和时频信号分析与处理的方法，扩展了网络分析仪的可测量面，实现了夹具内器件特性的准确测量。
4. 校准测试夹具后，在射频至微波频段内对陶瓷贴片电容进行连续扫频测试，计算得到基本准确的等效电路参数，为陶瓷电容的研制和使用提供参考。

关键词：本征值；复介电常数；贴片电容

厦门大学博硕士论文摘要库

Research for Theory and Method of Measuring Microwave Ceramic Material and Ceramic Capacitor

Luo Chaoyi

Abstract

Nowadays, Microwave Dielectric Ceramics (MWDC) have been widely applied to many fields of microwave technology, especially in the mobile communication system. The measurement of their dielectric performance has already aroused the attention of more and more people. The chip Multilayer Ceramic Capacitors (MLCC) which dielectrics are made of ceramics also have been used in radio frequency and microwave circuits largely, so the accurate measurement of their circuit parameters looks important increasingly.

This paper according to the need of the project--National 863 High-tech Plan—"Research of New Microwave Dielectric Ceramics Materials and Components", carries out the research on the theory and method of measuring the ceramic materials and capacitors. The work in this paper can be summarized as follows:

1. A new theoretic method--Eigenvalue Method is presented to solve the complex electromagnetic parameter of medium placed in an arbitrary resonant cavity. The new method is first applied to compute the complex permittivity of the dielectric resonator in various parallel plates. The toolbox PDE (Partial Differential Equation) of the mathematic software MATLAB is used to solve these problems conveniently, which avoids the difficulty of setting up and solving the transcendental equation. Eigenvalue Method is then used to calculate the relative complex permittivity of several dielectrics with large dimension and a ceramic sample in the rectangular resonant cavity. These results are accurate. The new method breaks the limit of the classical perturbation method.

2. From the viewpoint of electromagnetics, this paper proves three basic formulas frequently used in the microwave measurement and calculation more precisely, which makes the measuring theory more reliable.

3. In this paper, the measurable ports of the network analyzer are extended by the means of

fixture de-embedding and by analyzing and dealing with the signals in the time and frequency domain. This implements the accurate measurement of the device in the fixture.

4. After calibrating the testing fixture, the chip ceramic capacitors are measured in the range from radio frequency to microwave frequency continuously and the accurate equivalent circuit parameters are obtained by computed. This will provide reference for the manufacture and usage of the ceramic capacitors.

Key words: eigenvalue; complex permittivity; chip capacitor;

目 录

中文摘要	i
英文摘要	iii
第一章 绪论	1
1.1 课题的研究意义和背景	1
1.2 介质的复介电常数及其测量方法	1
1.3 本论文其余各章的主要内容	4
第二章 求解谐振腔内介质复电磁参数的新方法	5
2.1 问题的数学模型	5
2.2 谐振腔的品质因数 Q 值	12
2.3 本章小结	14
第三章 本征值法求解介质谐振器的复介电常数	15
3.1 求解模型	15
3.2 有限元法简介	18
3.3 求解工具	23
3.4 求解实例	26
3.5 本章小结	30
第四章 本征值法求解矩形腔内介质的复介电常数	31
4.1 理论分析	32
4.2 求解实例	35
4.3 本章小结	41
第五章 实验数据的获取	42
5.1 微波网络的散射关系	43
5.2 散射参数的测量	47
5.3 测量实例	55

5.4 本章小结·····	58
第六章 陶瓷贴片电容的测量·····	59
6.1 陶瓷贴片电容的等效电路·····	59
6.2 测量原理·····	61
6.3 测试夹具的校准·····	63
6.4 测量结果与讨论·····	71
6.5 本章小结·····	74
第七章 总结·····	75
参考文献·····	76
论文发表情况·····	78
致谢·····	79

CONTENTS

Abstract in Chinese.....	i
Abstract in English.....	iii
1 Introduction.....	1
1.1 Sense and Background of this Paper.....	1
1.2 Complex Permittivity of Medium and Its Measurement.....	1
1.3 Main Content of Other Chapters in this Paper.....	4
2 A New Method for Solving the Complex Electromagnetic Parameter of a Medium in a Resonant Cavity.....	5
2.1 Mathematic Model of the Problem.....	5
2.2 Quality Factor of Resonant Cavity.....	12
2.3 Brief Summary of Chapter Two.....	14
3 Solving the Complex Permittivity of Dielectric Resonator with the Eigenvalue Method.....	15
3.1 Model to Be Solved.....	15
3.2 Brief Introduction to Finite Element Method.....	18
3.3 Solving Tool.....	23
3.4 Examples Solved.....	26
3.5 Brief Summary of Chapter Three.....	30
4 Solving the Complex Permittivity of Dielectric in a Rectangular Cavity with the Eigenvalue Method.....	31
4.1 Theoretic Analyse.....	32
4.2 Examples Solved.....	35
4.3 Brief Summary of Chapter Four.....	41
5 Data Obtained from Experiment.....	42
5.1 Scattering Relation of Microwave Network.....	43
5.2 Measurement of Scattering Parameter.....	47

5.3 Example of Measurement.....	55
5.4 Brief Summary of Chapter Five.....	58
6 Measurement of Chip Ceramic Capacitors.....	59
6.1 Equivalent Circuit of Chip Ceramic Capacitor.....	59
6.2 Measuring Principle.....	61
6.3 Calibration of the Testing Jig.....	63
6.4 Results of Measurement and Discussion.....	71
6.5 Brief Summary of Chapter Six.....	74
7 Summary.....	75
Reference.....	76
List of Papers.....	78
Acknowledgement.....	79

第一章 绪 论

1.1 课题的研究意义和背景

作为介质材料之一的微波介质陶瓷（MDC）是近几十年逐渐发展起来的一类新型电子材料，用其制作的微波介质器件具有易于小型化、损耗低、温度系数小的特点。微波介质陶瓷材料制造成本低，是一种经济的电子元器件材料^[1]，可以用来制造介质滤波器、微波介质振荡器、双工器以及电容器等微波和射频元器件，这些元器件被广泛应用于各种现代通信系统和射频电路中。对于使用某一介质材料的电子系统，材料的电磁性质在很大程度上决定了系统的性能和特点，因此对介质材料电磁参数进行测量具有重要意义。

近年来随着表面贴装技术（SMT）及便携式电子产品迅猛发展，开发出各种尺寸小、性能好的贴片式元器件（SMD），使用陶瓷材料作为介质的贴片式多层陶瓷电容器（MLCC）就是十分出色的贴片式元件之一。由于它有极好的性能、多种不同的品种、规格齐全、尺寸小、价格便宜，并且有可能取代铝电解电容器及钽电解电容器等特点，得到极其广泛的应用。MLCC 可适用于各种电路，如振荡电路、定时或延时电路、耦合电路、去耦电路、滤波电路、抑制高频噪声电路、旁路等。陶瓷贴片电容的主要电路参数是等效串联电阻（ESR）、电容量（C）和等效串联电感（ESL），只有准确获知这些参数后才能将其应用于相关的射频或微波电路中，因此在高频段对这些参数进行测量是很有必要的。

本课题是国家 863 项目《新型微波介质陶瓷材料与元件的研制》的研究任务。围绕着微波陶瓷材料与陶瓷电容的测量理论和方法展开工作：研究了一种统一的求解方法方便地解决了各种平行板内陶瓷介质复介电常数的计算问题；采用类似的方法首次测量并求解了矩形谐振腔内的大尺寸电介质和高介陶瓷材料的复介电常数；最后用自行设计的夹具对陶瓷贴片电容在射频至微波频段内进行连续扫频测试，计算得到其等效电路参数，为陶瓷电容的研制和使用提供参考。

1.2 介质的复介电常数及其测量方法

1.2.1 复介电常数

介质的复介电常数是表征介质材料介电性能的重要参数,它的测量理论是本论文研究的主要部分。下面从介质内电磁场储能和损耗的角度介绍复介电常数实、虚部的意义。

当电场 \vec{E} 作用于介质时,介质发生极化,极化的程度可用电极化强度 \vec{P} 来描述。定义电位移矢量 \vec{D} 为

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

其中, ε_0 为真空中的介电常数(或称电容率)。

对于线性各向同性的介质,有

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

其中, ε 为介质的介电常数,是一个标量。

根据上面两式,有

$$\vec{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \vec{E}$$

在静电场的情况下, ε 为一实数 ε' , 反映介质储存电场能量的能力。

在正弦交变电磁场的情况下,介质的极化跟不上电场的变化,称为慢极化,这造成电位移相对于电场有一个滞后的相位,用复数表示时即

$$\vec{D} = (\varepsilon' - j\varepsilon'') \vec{E}$$

这样,在一个正弦振荡周期 T 内,介质储存的平均电场能量密度 \bar{w}_e 为

$$\bar{w}_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\frac{1}{2} \varepsilon \vec{E} \cdot \vec{E}^* \right) = \frac{1}{4} \varepsilon' |\vec{E}|^2$$

其中, $*$ 表示取复共轭。

又已知极化电流 $\vec{J}_p = j\omega \vec{P}$ 。其中, ω 为正弦电磁场的振荡角频率。这样,

介质内由极化电流 \vec{J}_p 引起的平均功率损耗密度 \bar{p}_p 为

$$\bar{p}_p = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\vec{J}_p \cdot \vec{E}^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (j\omega \vec{P} \cdot \vec{E}^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [j\omega (\varepsilon' - j\varepsilon'' - \varepsilon_0) \vec{E} \cdot \vec{E}^*] = \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' |\vec{E}|^2$$

从上式可以看出,频率越高,介质的损耗越大。

除了慢极化会引起介质的损耗,介质的漏电导也是造成介质损耗的一个重要因素。由欧姆定律

$$\bar{J}_\sigma = \sigma \bar{E}$$

其中, σ 为介质的电导率, \bar{J}_σ 为漏导电流。在电场内的介质, 若 σ 不为零, 将产生漏导电流 \bar{J}_σ 。这样, 介质内由漏导电流 \bar{J}_σ 引起的平均功率损耗密度 \bar{p}_σ 为

$$\bar{p}_\sigma = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\bar{J}_\sigma \cdot \bar{E}^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\sigma \bar{E} \cdot \bar{E}^*) = \frac{1}{2} \sigma |\bar{E}|^2$$

假设介质是均匀的, 体积为 v 。谐振时, 其内的平均电场能与磁场能相等。定义介质的品质因数 Q 为

$$Q = 2\pi \frac{W}{PT}$$

其中, W 为介质内平均电磁场储能, P 为介质平均损耗功率。那么有

$$Q = 2\pi \frac{2 \int_v \bar{w}_e dv}{T \int_v (\bar{p}_p + \bar{p}_\sigma) dv} = \omega \frac{\frac{1}{2} \int_v \varepsilon' |\bar{E}|^2 dv}{\frac{1}{2} \int_v (\omega \varepsilon'' + \sigma) |\bar{E}|^2 dv} = \frac{\omega \varepsilon'}{\omega \varepsilon'' + \sigma} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}}$$

定义介质的损耗正切为

$$\tan \delta = \frac{1}{Q}$$

定义介质的复介电常数 ε 为

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) = \varepsilon' (1 - j \tan \delta)$$

相对复介电常数 ε_r 为

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r (1 - j \tan \delta)$$

从以上的分析可以看出, 复介电常数的实部表征介质存储电场能量的能力, 虚部表征介质的损耗——主要包括慢极化损耗和漏电导损耗。

对于大多数介质, 有 $\tan \delta \ll 1$, 因此

$$\left| \frac{\sigma}{\omega} \right| \ll |\varepsilon' - j \varepsilon''| \quad (1.2-1)$$

对于微波介质陶瓷, 通常要求其相对介电常数 ε'_r 在 20-100 之间。在微波频段内, ε'_r 基本为定值, 随频率变化不大, 但陶瓷介质的 Q 值反比于频率 f , 在一

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库